

文章编号:1004-7220(2014)05-0475-06

· 综 述 ·

仿真假人研究的发展与展望

柳松杨^{1,2}, 吴 铨¹

(1. 空军航空医学研究所, 北京 100142; 2. 北京航空航天大学 生物医学工程学院, 北京 100083)

摘要: 动态假人在人体防冲击研究中发挥重要作用。在危险的冲击试验中从假人身上获取数据,是航空工业、汽车工业和其他产业研发防碰撞防护装备和系统的基本方法。一具仿真假人的性能,取决于其对人的仿真程度,以及能够采集信号的数量和质量。国外的仿真假人技术,不仅在研发航空弹射救生系统中发挥不可替代的作用,而且还应用于汽车制造等其他产业领域;中国直到2003年才由空军航空医学研究所研发成功具备中国人体特征的动态仿真假人,它具有与美国先进仿真假人相当的性能,已经在航空应用中发挥巨大作用。为了建立以中国人体数据为基础的冲击损伤鉴定标准,有必要研发符合中国人体特性的系列仿真假人,并加强数字虚拟人在冲击环境中的应用研究。

关键词: 仿真假人; 冲击试验; 损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

Development and prospect of dynamic dummy research

LIU Song-yang^{1,2}, WU Quan¹ (1. *Institute of Aviation Medicine, Beijing 100142, China*; 2. *School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China*)

Abstract: The dynamic dummy plays an important role in the research of protecting human beings from impact environment. To collect data from dummy in dangerous impact tests is the fundamental method used in developing protection equipment and systems in aerospace, automobile and other industries. The performances of a dummy depend on its simulation degree, as well as the quality and quantity of sampled signals. The dummy technology abroad is now indispensable in developing the protection of aviation ejection and rescue system, and also beneficial to automobile and other industries. China had no Chinese characterized dummy applied until the year of 2003 when the dynamic dummy was created in Institute of Aviation Medicine, and the dummy has equivalent high performance as that made by the United States and has been availablely exerted in aviation. For evaluating the impact injuries on Chinese human beings, it is necessary to further develop Chinese characterized dummy series, and to establish the all-around criteria by strengthening application of digital virtual dummy in impact environment study.

Key words: Dummy; Impact test; Injury

研究仿真假人的主要目的之一是应用它来评价人在冲击环境中的安全性。从技术层面上看,仿真假人既可以在高危的冲击试验环境中作为人的替身,也可以作为一个测试平台,来评价冲击环境中各种载荷是否会造成人的损伤,鉴定防护装备的防护效果,还可以为防护装备的优化设计提供依据^[1]。

从商品市场的国家战略上考虑,仿真假人还可以作为一个国家的技术门槛,通过强调地区性适用特点,对国外相关产品进行强制性技术测试,起到规范限制作用;在保障国民安全性的同时,也保护国产的相关产品能在国内市场上处于有利的竞争地位。

仿真假人是研制冲击防护装备并对其进行鉴定

试验必备的工具。假人的仿真程度和所能提供的可测量参数,是提高应用研究水平与创新能力的最关键要素。仿真假人既可应用于航空航天与人的生命相关的冲击环境的测试,如飞行器乘员的紧急逃生试验、直升机座椅抗坠毁试验、载人航天器发射与回收试验、运输机/客机紧急迫降试验、降落伞空投试验等,也可用于各种其他危险冲击环境的测试,如机动车碰撞安全测试、游乐设施安全性测试、爆炸冲击对人体的损伤及防护试验、运动损伤试验等。

1 国外仿真假人的发展及现状

为判断弹射系统能否安全救生,美国安德森研究所在1950年研制出第1个仿真假人GARD-CG。它在外形尺寸、重量和整体重心等方面与相应百分位的人体一致,但动态特性非常有限,且不能对人体关节进行仿真^[2]。

1960年代,随着美国汽车乘员的安全防护问题受到普遍重视,仿真假人研究的重点转向为汽车行业服务。安德森研究所在福特和通用汽车公司的支持下,针对汽车碰撞对人体的损伤特点,成功研制了用于汽车安全防护研究的VIP仿真假人。

1972年,美国汽车产业界与第一技术安全公司合作,在安德森研究所Hybird I型仿真假人的基础上,研制出Hybird II型仿真假人。1976年,第一技术安全公司、美国机动车工程师协会及西方汽车产业界共同开发了Hybird III型动态仿真假人,并形成包括成年人和不同年龄儿童假人在内的系列产品。Hybird III型系列动态仿真假人已在世界很多国家被广泛采用,是目前用于汽车安全防护研究最先进的假人,其结构的主要特点包括:①头部用铸铝做结构,用乙烯树脂做皮肤,为中空结构,头盖骨可取下,便于安装传感器。②仿真颈部在X向的动态响应与人体一致。③用带有聚合物基阻尼材料的6根弹簧钢仿真人体肋骨,具备接近人体胸部力-变形的特性。④腰椎由天然橡胶柱体制成,对人体腰椎在X向的冲击响应进行初步模拟。⑤膝关节的特殊设计可模拟韧带损伤。⑥各关节由具有摩擦力的活动铰组成,具备1g的平衡能力^[3-6]。

仿真假人还广泛应用于新型飞机的研发。西方在1970年代投入使用的第3代战斗机,要求安全救生包线能达到1 000 km/h,甚至是1 200 km/h。为

满足这样的救生包线要求,美国研制了ACES-II和SIII S弹射座椅,英国研制了MK-10弹射座椅,座椅上装备了防高速气流吹袭的四肢约束装置;但由于试验所用假人仿真程度太低,所能测量的生理数据太少,在没有充分验证弹射座椅是否达到救生包线要求的情况下,这些座椅被按原定救生包线投入应用,结果造成大量飞行员在高速弹射时出现伤亡。美国1990年代发表的报道显示,普遍装备美国第3代战斗机的ACES-II弹射座椅,在飞机速度超过920 km/h弹射时,飞行员的死亡率接近90%^[7]。

鉴于高速气流吹袭对飞行员的巨大伤害,1983年,美国空军航空医学研究所、空军系统研究所和安德森研究所联合研制了LRE动态仿真假人^[8-9]。LRE的出现及随后进行的研究工作,使西方国家对高速气流吹袭造成的飞行员损伤有了更为深入和全面的认识。在实施乘员逃生系统测试(crew escape system test,CREST)计划的过程中,研究人员发现LRE还是不能满足试验要求,具体原因是缺乏对人体脊柱的仿真,胸部结构和肌肉仿真程度低,部分传感器安装不能适应要求,造成所能记录的信号也不满足要求等。1986年,美国空军航空医学研究所和系统研究所牵头,开始研制ADAM动态仿真假人。1989年,ADAM研制工作完成,并在1990年代用于第4代弹射救生系统验证计划^[10-13]。

ADAM是目前世界上仿真程度最高、生理测量数据最全面的假人,其主要特点有:①外形尺寸符合美国第3百分位和第97百分位的飞行员。②按照人体17个分段进行仿真,包括:头、颈、胸、腹、骨盆、上臂、前臂、手、大腿、小腿和脚。各分段的重量、重心、转动惯量与相应百分位的飞行员数据一致。③各关节的活动范围与人一致,并且具有拟人的阻尼特性。④能够仿真颈椎、胸腰椎和胸部。⑤假人内装有包括力、力矩、加速度、角速度、角度、位移和温度传感器,可采集记录信号达64路。⑥体内固态记录器和遥测装置可同时记录和发送128路信号。⑦结构强度可承受速度为1 300 km/h的气流吹袭。

LRE和ADAM的开发成功,使美国航空航天救生装备能重新处于世界领先水平,应用此类假人研发的自适应弹射救生系统已经完成验证计划,并将装备第4代战斗机。

西欧国家在研发航空航天救生系统时,所用动态仿真假人基本上都是美国制造的。在汽车检验行业,美国动态仿真假人始终占据主要市场。值得一提的是,1990年代,在欧洲经济共同体的实验车辆委员会资助下,欧共体多国政府和荷兰联合开发了侧碰撞假人 EUROSID,对美国制造的汽车进入欧洲市场增加了难度。

俄罗斯继承了前苏联航空航天工业雄厚的技术基础,其动态仿真假人的研发独立于美国和西欧,但同样具备了高仿真和记录能力强的特点。可以肯定的是,俄罗斯 K-36 弹射座椅卓越的高速气流防护性能,与 SKF 仿真假人试验提供的大量数据是分不开的。

为了打破美国的技术限制,日本也在仿真假人的研发上进行了不懈的努力。本田公司于 1998 年在世界上首先开发了第 1 代行人假人 POLAR-I,在 2000 年又开发了第 2 代行人假人 POLAR-II。行人假人注重了人体各关节特征的仿真,而且可以测量头、颈、胸等全身 8 个部位的动态载荷。2008 年,本田公司推出最新的行人假人 POLAR-III,进一步提高人体特征的仿真度。相对于 POLAR-II 而言, POLAR-III 主要的改变来自身体下半部位,包括对腰部、大腿、膝部与小腿的仿真,各部位拥有更高仿真度的复杂结构,可以更真实地模拟遭受车辆撞击时人体的受力情况^[14]。

除成人系列假人外,美国还针对不同测试目的,研发了婴幼儿系列动态仿真假人、侧碰撞假人以及被撞行人假人。其下一步发展的设想是,研制孕妇假人、提高脊柱的仿真水平、研制仿真内脏、提高肌肉及皮肤的仿真水平等。高性能动态仿真假人应用的发展,反映出其在提高航空、航天及机动车安全防护能方面扮演的关键角色。目前,西方国家在安全防护装备的设计中更加注重以人为本的设计思想,政府也投入大量研究资金,运用现代技术手段来提高仿真假人的仿真水平,从而提高生命和安全保障的效能^[15-16]。

2 我国仿真假人的研究进展

我国自行研发的仿真假人有 3 种,其中空军航空医学研究所于 2006 年研制成功的动态仿真假人性能与 ADAM 接近。机动车行业还没有自行开发的假

人,现在普遍应用的是进口 Hybird III 型仿真假人。

1970 年代,为了测试我国弹射座椅的性能,我国研发了第 1 代弹射假人,其性能相当于美国 CG 假人的水平,分大、中、小 3 种,特点是外形尺寸和整体重心符合当时的第 5、50 和 95 百分位飞行员的外形尺寸和重心,体内无任何传感器,仅能测量胸腔部位的三向加速度和三向角速度值。

为配合航天工程,我国于 1996 年完成的宇航员形体假人研发,仅有 1 个型号。主要模拟参数为:身高 1.68 m,体重 60 kg,仿真人体 14 个分段的重量;假人还仿真了人体主要外形尺寸,包括躯干与大腿夹角、大腿与小腿夹角、小腿与足的夹角等。航天形体假人以固化硅橡胶内衬聚胺脂泡沫为材料,附着在不锈钢管构架上,体内无固定传感器,主要用于航天服设计与评价。由于这种假人在强度上考虑得非常少,限制了它在高载荷试验中的应用。

为配合我军的相关重点型号工程,2003 年,空军航空医学研究所柳松杨高级工程师带领的团队开始研发符合我国飞行员特性的动态仿真假人,研发工作按 5 个系统展开:人体测量分系统、结构分系统、信号处理分系统、软件分系统和试验分系统。2006 年,动态仿真假人通过了技术鉴定,目前已在空、海军的多个型号研究中发挥了关键作用^[17]。其主要性能如下:

- (1) 外形尺寸符合第 3、50、和 97 百分位飞行员人体尺寸。
- (2) 假人整体及各分段重量、重心和整体转动惯量与相应百分位飞行员一致。
- (3) 四肢关节活动范围与人体一致。
- (4) 假人体内安装多种传感器,传感器作为骨架的一部分嵌入骨架中。传感器包括:载荷传感器、加速度传感器、角速度传感器、角位移传感器和温度传感器等,所测信号不少于 64 路。
- (5) 假人体内安装双套固态记录器,可实时记录体内信号。
- (6) 假人强度能承受 1 300 km/h 的气流吹袭不出现损坏。

空军航空医学研究所研发的动态仿真假人,显著提高我国仿真假人的性能水平,与国外先进仿真假人性能相当。其与国外相关仿真假人的主要性能对比参见表 1。

表1 动态仿真假人与国内外相关仿真假人的对比

Tab.1 Comparison of foreign and domestic dynamic dummy

	百分位										
	现行弹射假人			Hybrid III			动态仿真假人			ADAM 假人	
	5	50	95	5	50	95	3	50	97	3	97
基础数据来源	70年代中国成年男性			美国人成年男性			中国成年男性			美国成年男性	
各分段惯性参数与人体一致性	无			是			是			是	
四肢关节活动范围	有限运动			有限运动			与人体一致			与人体一致	
四肢关节安装角	无			无			有			有	
位移传感器											
独立骨架系统	无			是			是			是	
传感器融入骨架	无			是			是			是	
颈椎	刚性			仿真			仿真			仿真	
胸腰椎	无			模拟腰椎			模拟腰椎			仿真胸腰椎	
四肢关节	简单关节			仿真关节			仿真关节			仿真关节	
皮肤肌肉	一般橡胶			仿真(螺栓固定)			仿真(拉链)			仿真(拉链)	
骨盆结构	坐/立			坐			坐/立			坐/立	
数据测试方式	遥测			拉线			双套体内固态记录器			体内固态记录器/遥测	

3 对我国发展仿真假人研究的展望

3.1 研发符合中国人特性的系列仿真假人

仿真假人的主要功用是建立一个仿真的人体测试平台,通过记录、分析人体所受的载荷和发生的变形,评价人在冲击环境中的受力情况和可能发生损伤的情况。在冲击环境中,人体所受载荷和变形与人体外形、关节活动范围及人体各运动段的惯性参数密切相关。目前国内冲击试验大多采用 Hybrid III 假人,但 Hybrid III 假人设计参照的是美国人的

体测量参数。由于人种差异的原因,其第 50 百分位的身高与体重参数,与我国第 95 百分位成年男性的身高与体重大致相当,但人体各运动段的参数差别则很大^[18]。表 2、3 所示为中、美飞行员的人体参数对比情况。由表 2、3 可知,中、美飞行员人体测量数据存在差异。由于受座舱空间的限制,选拔飞行员时对身高有较严格的标准要求。因此,在中、美成年人人体测量数据之间的实际差异,应该比中、美飞行员人体测量数据的差异更为明显。

表2 中、美男性飞行员的主要外形尺寸

Tab.2 Main dimensions of Chinese and American male pilots

国家	百分位	外形尺寸/mm								
		身高	座高	胸宽	胸厚	大转子点高	大腿围	前臂长	上臂长	上臂围
中国	97	1 773	964	320	272	900	586	244	337	300
美国	97	1 886	953	356	269	1 008	635	287	353	338
中国	3	1 634	884	282	206	815	510	211	310	264
美国	3	1 683	876	306	226	884	536	254	310	284

表3 中、美男性飞行员整体及各运动分段的质量

Tab.3 Mass of the whole and each motion segment of Chinese and American male pilots

国家	百分位	整体和运动分段质量/kg								
		体重	头颈	躯干	大腿	小腿	足	上臂	前臂	手
中国	97	83.9	6.46	35.40	11.83	3.88	1.03	2.35	1.23	0.54
美国	97	97.7	5.72	47.70	11.74	4.54	1.13	2.45	1.68	0.59
中国	3	55.3	5.34	23.78	7.71	2.23	0.76	1.51	0.78	0.40
美国	3	63.3	5.08	28.70	7.76	3.08	0.77	1.54	1.13	0.45

上述比较分析表明,国外研发的仿真假人测试数据并不能完全反映我国国民的身体特征,也不能完全用于适于我国国民损伤特性分析,以此研发的防护装备也就不能提供最优的防护。因此,我国应重视从政府层面考虑、规划和研发符合中国人特性的系列仿真假人。空军航空医学研究所成功研发出飞行员动态仿真假人,证明了我国已具备研发高性能动态仿真假人的技术能力。

3.2 以中国人体数据为基础形成损伤鉴定标准

人在不同冲击环境中所受的损伤是有差别的。机动车碰撞伤主要是由水平冲击导致,航空弹射伤主要是由垂直冲击和高速气流吹袭导致,而爆炸伤主要是直接冲击与间接冲击导致的复合伤。因此,针对不同的冲击环境要有相应的损伤鉴定标准。美国、俄罗斯和欧共体均形成了独立的损伤测试与判断标准,我国空军也建立了符合自身特点的弹射损伤测试与判断标准体系。形成一套具有自主知识产权的损伤测试与判断标准体系离不开生物力学试验,但我国只有军方在进行有计划的生物力学研究工作,民用方面的相关研究还比较分散,与建立以中国人体数据为基础的损伤鉴定标准尚有相当大的距离。因此,有必要对相关工作进行顶层设计规划,特别是要有针对性地重点开展各类事故分析、有规划地进行人体冲击耐限研究,并与已开展的各类冲击试验数据进行对比分析,才能科学地构建以中国人体数据为基础的损伤鉴定标准体系。

3.3 加强数字虚拟人在冲击环境中的应用研究

数字虚拟技术是在现代科技发展兴起的高新技术,近年来更是在各类人体冲击模型研究中发展成为必不可少的重要技术手段。自1970年代起,计算机技术的迅速发展,推动了数字虚拟技术在建立人体动力学模型中的普遍应用。应用于人体冲击研究

领域的相关模型,经历了单自由度集总参数模型、多自由度集总参数模型、二维和三维多刚体动力学模型、三维多体动力学模型等多个发展阶段。经过几十年的发展,数字虚拟技术已经成熟应用于各类人体冲击环境的相关研究。国外著名的多体动力学软件包,已经商业化并普遍应用于汽车碰撞防护、检测等领域。我国的虚拟人技术也有了长足的发展,并成功应用于建立各种与人体相关的动力学模型,显著提高了模型仿真度和可靠性,在航空、航天冲击环境相关研究和应用中发挥重要作用。随着技术的进一步发展,未来建立在虚拟人技术上的人体动力学模型,将会越来越多地取代各种人体冲击试验。

参考文献:

- [1] 柳松杨,刘宝善,杨毅,等. 标准动态仿真假人[C]//全国第八届安全救生学术交流会议文集. 襄阳:中国航空学会人体工程航医救生分会安全救生委员会,2004:91-94.
- [2] Georg DF, Paul HF. The development of a dynamic response sensing and recording system for incorporation into a state-of-the art Manikin [C]//Proceedings of Safe 20th Annual Symposium. Las Vegas, USA: [s. n.], 1982.
- [3] Paul HF. Development of a new instrumented army prototype manikin implementing an articulated/flexible spine [C]//Proceedings of Safe 30th Annual Symposium. Las Vegas, USA: [s. n.], 1992.
- [4] Georg DF, Paul HF. Structural integrity tests of a modified hybrid III manikin and supporting instrumentation system [J]. Safe J, 1985, 15(2): 19-18.
- [5] Georg DF, Phillip EW. High speed ejection tests of a modified hybrid III manikin [C]//Proceedings of Safe 23rd Annual Symposium. Las Vegas, USA: [s. n.], 1985.
- [6] Paul HF, Jhon Q. Next generation data acquisition and storage system for the hybrid III manikin [C] //Proceedings of Safe 29th Annual Symposium. Las Vegas, USA:

- [s. n.], 1991.
- [7] Payne PR. On the avoidance of limb flail injury by ejection seat stabilization [M]. Ohio, USA: Aerospace Medical Research Lab, 1974.
- [8] Richard PW, Richard DL. A new high-fidelity human analog for ejection testing [J]. *Safe J*, 1985, 15(2): 30-40.
- [9] Richard PW. Preliminary design of limb restraint evaluator [M]. Ohio, USA: Aerospace Medical Research Lab, 1985.
- [10] Roy RR. The USAF advanced dynamic anthropomorphic manikin-ADAM [C]//Proceedings of Safe 24th Annual Symposium. San Antonio, USA: [s. n.], 1986.
- [11] Jhon AP. The ADAM/MASE integration tests: A progress report [C]//Proceedings of Safe 29th Annual Symposium. Las Vegas, USA: [s. n.], 1991.
- [12] Annette LR, Louise AO. Development of a simulation database for the advanced dynamic anthropomorphic manikin (ADAM) [C]//Proceedings of Safe 32nd Annual Symposium. Reno Nevada, USA: [s. n.], 1994.
- [13] Roy RR, Jhon AP. The advanced dynamic anthropomorphic manikin-ADAM [J]. *Safe J*, 1993, 23(4): 41-45.
- [14] 国内进行首次行人碰撞试验,专访本田技术专家[EB/OL]. <http://auto.ifeng.com/news/domesticindustry/20090823/88215.shtml>.
- [15] Richard PH. Development of a mechanical analog of human spine and viscera [C]//Proceedings of Safe 24th Annual Symposium. San Antonio, USA: [s. n.], 1986.
- [16] Paul HF, William B. Design and development of an enhanced biodynamic manikin [M]. Fort Detrick, USA: Army Aerospace Medical Research Lab, 1994.
- [17] 柳松杨, 徐元铭, 杨春信. 航空航天仿真试验假人研制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(2): 191-194.
- [18] 柳松杨, 杨毅, 卜伟平, 等. 中、美男性飞行员外形尺寸与惯性参数比较[J]. *中航救生*, 2010, 1: 43-44.

《医用生物力学》杂志征稿、征订启事

《医用生物力学》杂志由中华人民共和国教育部主管、上海交通大学主办,是国内唯一一本公开发行,积极反映生物力学基础研究与应用研究成果,推动国内外学术交流,促进医、生、理、工各学科相互了解和合作为目的学术性刊物。报道内容主要包括生物力学领域中有关力学生物学、器官-组织生物力学、细胞-亚细胞-分子生物力学、感觉系统生物力学、骨骼肌肉系统生物力学、航空航天生物力学、颌面口腔生物力学、呼吸系统生物力学、康复工程生物力学、心血管系统生物力学、血液流变学、医用材料生物力学、运动医学生物力学等的研究论文。本刊为中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊);美国《化学文摘》、波兰《哥白尼索引》、俄罗斯《文摘杂志》、荷兰《文摘与引文数据库》来源期刊;2012年入选北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》(2011年版)。

本刊为双月刊,每双月25日出版,16开本,96页,国内统一连续出版物号CN 31-1624/R,国际标准连续出版物号ISSN 1004-7220;定价每期15.00元,全年90.00元,由邮局向全国征订发行,邮发代号4-633。读者可在附近邮局订阅或通过邮政“11185”客户服务中心电话订阅。欢迎广大读者、作者订阅本刊,踊跃来稿。

地址:上海市制造局路639号200011

电话:(021)23271133;传真:(021)63137020;电子信箱:shengwulixue@gmail.com

网址:www.medbiomechanics.com, www.mechanobiology.cn